

Доцент Олефір О. С., магістрант Ткаченко П. Г.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИГОРЯННЯ ПАЛИВНИХ ЧАСТОК В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

### Abstract

*Oleksandr S. Olefir, assoc. prof.; Pavlo Tkachenko, student*

*Mathematical modelling of burning out of fuel particles in power plants*

*In the article the complex mathematical model of burning out of fuel particles in power plants is presented. The deduced model is numerically solved by Gere's method with combination of Vagstein's method in a special program product. The got decision answers the set problem and does not conflict with physics of process.*

### Вступ

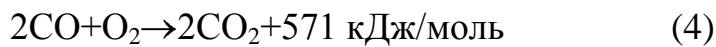
Вугільна промисловість є однією з найбільш крупних галузей народного господарства України. Доля вугілля складає близько 94-96% в загальному об'ємі власних енергоносіїв країни, що використовуються. При використанні цього енергоресурсу постають такі проблеми: оптимальність використання палива, технологічні питання спалювання палива, зменшення шкідливих викидів виробництва в атмосферу тощо. Для часткового подолання цих проблем використовують математичне моделювання процесів, що проходять в енергетичних установках [1].

Існує багато моделей, але вони мало придатні для створення ефективних програмних засобів їх реалізації. В даній статті пропонується комплексна, призначена для програмної реалізації математична модель вигоряння паливних часток в енергетичних установках.

### Постановка задачі

Приймемо наступну фізичну модель процесу: реагування протікає на поверхні частки палива сферичної форми; конвекційний переніс теплоти із системи відсутній, радіаційний теплообмін моделюється взаємодією реагуючої суміші з опромінювачем; теплообмін частки з газовим середовищем відбувається шляхом конвекції і радіаційного теплообміну. В процес вступають частки, що складаються лише із горючої суміші [2].

Приймається, що на процес мають вплив наступні реакції:



Метою роботи є створення комплексної прикладної математичної моделі вигорання паливної частки в енергетичній установці.

## Математичне моделювання вигорання паливних часток в енергетичних установках

Існуючі моделі вигорання частки твердого палива в енергетичній установці представляють собою нелінійні неоднорідні системи диференціальних рівнянь. До того ж, такі системи – жорсткі.

Для розв'язку майбутньої моделі скористаємось методом Гіра, який призначений для розв'язку саме таких систем. Отриману в результаті використання метода Гіра систему нелінійних алгебраїчних рівнянь розв'яжемо методом простої ітерації в поєднанні з методом Вагстейна.

За основу дослідження була взята математична модель, наведена у [2]. Автори пропонують наступні зміни: константи швидкостей реакцій враховують як кінетичну, так і дифузійну складові; не враховується внесок дифузійної теплопровідності від кисню і вуглекислого газу до поверхні палива, так як він не має суттєвого впливу на процес; виведені рівняння для концентрацій кисню і вуглекислого газу біля поверхні частки; модель доповнена диференціальним рівнянням зміни концентрації CO.

Розглянемо комплексну математичну модель вигорання частки в енергетичній установці з урахуванням реакцій (1)-(4).

1) Рівняння виходу та вигорання летких речовин паливної частки:

$$\frac{dV_v}{d\tau} = (V^T - V_v) \cdot \alpha_{v,l} \quad (5)$$

$$\frac{dV_c}{d\tau} = (V_v - V_c) \cdot \alpha_{c,l} \quad (6)$$

2) Рівняння енергії для горіння паливної частки

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha_1 \varepsilon Q_1 + \alpha_2 Q_2 \bar{C}_R - \alpha_{21} Q_{21} C_{2R} \frac{273}{T_g} - Nu \frac{\lambda}{\delta} (T - T_g) - \sigma_0 \varepsilon_p \varphi (T^4 - T_{rad}^4)}{c_p \rho_p \delta} \quad (7)$$

3) Рівняння вигорання паливних часток

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{24}{32 \rho_p} (\varepsilon \alpha_1 + \alpha_2 \bar{C}_R + \alpha_{21} C_{2R} \frac{273}{T_g}) \quad (8)$$

4) Рівняння енергії газового середовища

$$c_g \frac{dT_g}{d\tau} = (V_v - V_c) \cdot \alpha_{c,l} \cdot Q_l \cdot (1 - W^p - A^p) \frac{1}{V_{sm}} + \chi_{12} C_1 Q_{12} + \frac{6Nu\lambda\delta}{\rho_p \delta_0^3 V_{sm}} \bar{T}_g (1 - W^p - A^p) + (V^T - V_v) \cdot \alpha_{v,l} (1 - W^p - A^p) \frac{c_g}{V_{sm} \rho_g} \bar{T}_g - \sigma_0 \varepsilon_g (S/V) \bar{T}_g^4 - T_{rad}^4 \frac{T_g}{273}, \quad (9)$$

5) Рівняння використання кисню в газовому середовищі

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[ \alpha_1 + \alpha_2 \bar{C}_R \frac{6 \cdot 12 \cdot C_R^0 \cdot v_k^0 \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^3 \frac{273}{T_g} + v_L^0 C_R^0 (V_v - V_c) \frac{1}{V^T} + \chi_{12} C_1 \right], \quad (10)$$

6) Рівняння зміни концентрації кисню та CO<sub>2</sub> біля поверхні частки

$$C_R = \frac{C}{\frac{\varepsilon \alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_D} + 1}, \quad (11)$$

$$C_{2R} = \frac{C_1}{\frac{\alpha_2}{\alpha_D} + 1}, \quad (12)$$

7) Рівняння масообміну для двоокису вуглецю

$$\frac{dC_2}{d\tau} = \left[ (\alpha_2 C_R - \alpha_{21} C_{2R}) \frac{6 \cdot 12 \cdot C_R^0 \cdot v_k^0 \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^3 \frac{273}{T_g} + (\varepsilon + 1) \chi_{12} C_1 + v_L^0 C_R^0 (V_v - V_c) \frac{1}{V^T} \right], \quad (13)$$

8) Рівняння масообміну для окису вуглецю

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{(\alpha_1 C_R + \alpha_{21} C_{2R}) \frac{6 \cdot 12 \cdot C_R^0 \cdot v_k^0 \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right)^3 \frac{273}{T_g} - \varepsilon}{\varepsilon + 1} \chi_{12} C_1, \quad (14)$$

де  $V_v$ ,  $V_c$  – кількість летких, що вийшли і згоріли за час  $\tau$ , кг/кг;  $V^T$  – вміст летких у паливі, кг/кг;  $\alpha_{v,b}$ ,  $\alpha_{c,l}$  – константи швидкості виходу і горіння летких, 1/с;  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_{21}$ ,  $Q_{12}$  – теплові ефекти реакцій (1)-(4), Дж/кг;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_{21}$ ,  $\chi_{12}$  – константи швидкостей реакцій (1)-(4), м/с;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газу, Вт/м\*К;  $C_R$ ,  $C_{2R}$  – концентрації O<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub> біля поверхні частки, кг O<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_p$  і  $\varphi$  – ступінь чорності і коефіцієнт опромінення частки;  $c$  – теплоємність, Дж/кг\*К;  $T$  – температура, К;  $Nu$  – критерій Нусельта;  $\delta$  – діаметр, м;  $C_1$  – концентрація CO, кг O<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>;  $v_k^0$ ,  $v_L^0$  – доля кисню, що йде на горіння коксу та летких;  $V_{sm}$  – кількість повітря на 1 кг палива, м<sup>3</sup>/кг;  $S/V$  – співвідношення між поверхнею і об'ємом газового середовища, 1/м;  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;  $W^p$ ,  $A^p$  – вологість і зольність палива, кг/кг;  $\varepsilon = 1,21$  – коефіцієнт, що враховує збільшення числа молів;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>. Індекси:  $p$  – частка,  $g$  – газове середовище,  $rad$  – опромінювач, 0 – початкове значення.

Система рівнянь (5)-(14) і буде математичною моделлю вигорання паливної частки в енергетичній установці. Для розв'язання отриманої математичної моделі був створений спеціальний програмний продукт.

Аналізуючи отримані результати моделювання, можна відзначити такий характер протікання процесу горіння:

1. Температура частки  $T_p$  і газового середовища  $T_g$  росте від початкового значення, досягаючи максимальних значень в 2000-2200 К.
2. Діаметр частки зменшується, починаючи від початкового значення, і досягає граничного значення (більшого за нуль).
3. Концентрації кисню  $C$  та  $C_R$  зменшується з плином часу.
4. Концентрації вуглекислого газу  $C_2$  і  $C_{2R}$  збільшується з плином часу.
5. При збільшенні коефіцієнту надлишку повітря час вигорання часток зменшується, те ж саме спостерігається при збільшенні початкової температури опромінювача. Тобто отримані результати не суперечать фізичним законам та закономірностям.

## Висновки

В даній роботі запропонована і досліджена комплексна математична модель вигорання паливних часток в енергетичних установках. Для математичної моделі окремо були виписані усі її складові із зазначенням їх фізичного змісту.

Також було створено спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання процесу, в якому результати моделювання наводяться в зручній графічній формі.

Результат моделювання відповідає поставленій задачі, він дає змогу відслідковувати процес на будь-якому етапі його протікання і при будь-яких умовах. Модель можна використовувати для вдосконалення технологічного процесу спалювання твердого палива. Виведена модель є основою для подальших досліджень у цій сфері. Модель можна ускладнювати, враховуючи інші реакції або більш точно враховувати внесок летких речовин у процес горіння за рахунок формування рівнянь для зміни густини частки та врахування пористості часток тощо.

## Література

1. В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. 1986. – 312 с.: ил.
2. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 562 с.: ил.
3. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд. – М.: Наука, 1967. – 728 с.: ил.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.: ил.